

Beiträge aus der Elektrotechnik

Florian Protze

**Verfahren zur Reduktion von Störsignalen in
Power-over-Data-Line-Systemen**

 VOGT

Dresden 2026

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the
Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2025

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Verfahren zur Reduktion von Störsignalen in Power-over-Data-Line-
Systemen“ von Florian Protze überein.

© Jörg Vogt Verlag 2026
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-089-6

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Technische Universität Dresden

**Verfahren zur Reduktion von Störsignalen in
Power-over-Data-Line-Systemen**

Dipl.-Ing.

Florian Protze

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Bahr

Gutachter:

Prof. Dr. sc. techn. Frank Ellinger

Prof. Dr.-Ing. Fabian Lurz

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Meyer

Tag der Einreichung: 29.07.2025

Tag der Verteidigung: 13.11.2025

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Dissertation zum Thema

Verfahren zur Reduktion von Störsignalen in Power-over-Data-Line-Systemen

ohne unzulässige Hilfe Dritter erstellt wurde. Sämtliche Ergebnisse und Ansätze anderer Autoren sind als solche gekennzeichnet. Es erfolgte weder im Inland noch im Ausland bis zum jetzigen Zeitpunkt eine Einreichung dieser Dissertation zum Zweck der Promotion. In der vorliegenden Form erfolgte keine Veröffentlichung. Teile des Inhalts wurden jedoch im Rahmen eines Patentverfahrens verwertet sowie bereits in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

Steinbach, den 28.07.2025

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Dresden entstanden. Diese Zeit konnte ich in besonderem Maße für die Erlangung eines breiten Wissens im Entwurf und der Messung integrierter Schaltung für mich nutzen. Für das dafür nötige, große Vertrauen und den stets wertschätzenden Umgang möchte ich vor allem Herrn Prof. Frank Ellinger danken. Mein Dank gilt auch den Verantwortlichen der Finanzierung von Forschungsvorhaben, ohne diese eine effektive Beschäftigung mit neuartigen Ansätzen nicht möglich wäre.

Allen Kollegen, welche meine Zeit an der Professur für Schaltungstechnik und Netzwerktheorie geteilt haben, möchte ich für den freundlichen Umgang, den interessanten Austausch und die lustigen Momente danken. Besonders hervorheben möchte ich meinen Dank an die Herren Dr.-Ing. Marco Gunia, Dipl.-Ing. Felix Schwarze und Dr.-Ing. Simon Buhr für die produktiven Diskussionen zu Fragestellungen der vorliegenden Arbeit. Herrn Prof. Udo Jörges und Herrn Dr.-Ing. Marco Gunia möchte ich zudem für das Lektorat dieser Dissertation danken.

Zuletzt gilt mein Dank meiner Familie und meinen Freunden für das unermüdliche Interesse am Fertigstellungszustand dieser Arbeit. Insbesondere aber meiner lieben Schwester, welche das Privileg, eine solche Arbeit verfassen zu dürfen, leider nicht hat und mir eine stetige Motivation liefert.

Zusammenfassung

Wenn *Power over Data Line* (PoDL) zur gleichzeitigen Energie- und Signalübertragung in Automobilen über eine einzige Zweidrahtleitung verwendet wird, können Kosten gesenkt werden, sodass eine breite Bevölkerungsschicht von mehr Verkehrssicherheit profitiert. In realen PoDL-Systemen verbleibt eine Kopplung der Störsignale der benötigten Spannungswandler auf die Signalübertragung aufgrund der Trennung im Frequenzbereich. Als Ansatz zur Reduktion der Störsignale wird die Optimierung von Spannungswandlern verfolgt. PoDL-Systeme erfordern aus Kostengründen hohe Schaltfrequenzen und somit eine große Komplexität des Modells aufgrund von parasitären Effekten.

Die Herleitung eines konventionellen Ansatzes zur Regelung zeigt die Implikationen des dafür benötigten linearisierten und gemittelten Modells auf. Gemäß der herausgearbeiteten Theorie muss hierbei ein Kompromiss zwischen Robustheit und Minimierung der Störsignale gefunden werden. Zudem wurden Vorarbeiten betrachtet, welche Techniken der künstlichen Intelligenz sowie alternative Modulationsverfahren zur Regelung ansetzen. Neuronale Netze und ein Trainingsverfahren wurden eingeführt.

Als elementare Fragestellung wurde in dieser Arbeit untersucht, wie die Störsignale von Schaltwandlern in PoDL-Systemen für eine Vielzahl von Betriebsbedingungen minimiert werden können und ob dafür ein neuronales Netz als Regler verwendet werden kann. Durch die Messung eines Testmusters konnte gezeigt werden, dass ein neuronales Netz auf Grundlage einer umfangreichen, hier entworfenen *Mixed-Signal*-Simulation derart trainiert werden kann, dass eine gute Eignung für Aufwärtswandler in PoDL-Systemen besteht. Dies wird durch eine Erhöhung der Schaltfrequenz um eine Größenordnung im Vergleich zu den Vorarbeiten auf über 600 kHz ermöglicht. Die genaue Modellierung des Eingangsnetzwerks und der Messung des Spulenstroms mit Beachtung parasitärer Effekte wurde als notwendige Bedingung ermittelt, welche keine der Vorarbeiten erfüllt. Bei Verwendung eines neuronalen Netzes als Regler konnte ein geringer manueller Regler-Entwurfsaufwand trotz des komplexen Modells beobachtet werden. Auch bei Abweichungen der zum Training verwendeten Modellgrößen konnte eine gute Näherung zum vorgegebenen, idealen Regelverhalten gezeigt werden. Somit stellt diese Arbeit einen signifikanten Schritt zur Ausnutzung des Potentials neuronaler Netze für die Regelung von Schaltwandlern mit Schaltfrequenzen über 50 kHz dar.

Abstract

When *Power over Data Line* (PoDL) is used for simultaneous power and signal transmission in automobiles over a single two-wire line, costs can be reduced, allowing a broad segment of the population to benefit from increased traffic safety. In real PoDL systems, there remains a coupling of the disturbance signals of the required voltage converters on the signal transmission due to the separation in the frequency domain. As an approach to reduce the disturbance signals, the optimization of voltage converters is pursued. PoDL systems require high switching frequencies for cost reasons, resulting in a high complexity of the model due to parasitic effects.

The deduction of a conventional control approach illustrates the implications of the linearized and averaged model required for this purpose. According to the elaborated theory, a compromise must be found between robustness and the minimization of disturbance signals. Additionally, preliminary work has been considered, which employs techniques of artificial intelligence as well as alternative modulation methods for control. Neural networks and a training procedure are introduced.

The fundamental question investigated in this work is how the interference signals from switching converters in PoDL systems can be minimized for a variety of operating conditions and whether a neural network can be trained as a controller for this purpose. Through the measurement of a test sample, it was demonstrated that a neural network can be trained based on a comprehensive mixed-signal simulation designed here, showing good suitability for boost converters in PoDL systems. This is made possible by increasing the switching frequency by an order of magnitude compared to previous works to over 600 kHz. The precise modeling of the input network and the measurement of the inductor current, taking into account parasitic effects, was identified as a necessary condition that none of the previous works fulfilled. When using a neural network as a controller, a low manual controller design effort was observed despite the complex model. Even with deviations in the model parameters used for training, a good approximation to the specified ideal control behavior was demonstrated. Thus, this work represents a significant step towards leveraging the potential of neural networks for the control of switching converters with switching frequencies above 50 kHz.

Inhaltsverzeichnis

Selbstständigkeitserklärung	I
Danksagung	III
Zusammenfassung	V
Abstract	VI
1 Einleitung	1
2 Motivation	5
2.1 <i>Power over Data Line</i> (PoDL)	7
2.2 Lösungsansatz mit aktiver Störsignalunterdrückung . .	11
2.3 Lösungsansatz eines Schaltwandlers mit maximal hoher Regelbandbreite	13
3 Grundlagen von Schaltwandlern	15
3.1 Schaltungstechnik	18
3.2 Regelungstechnik	23
3.2.1 Modellierung für lineare Regelungstechnik . . .	25
3.2.2 <i>State-Space-Averaging</i>	28
3.2.3 Übertragungsfunktionen im linearisierten gemit- telten Modell	35
3.2.4 Lineare Regelungstechnik	37
3.2.5 Simulative Untersuchung des <i>Current-Mode</i> -Rege- lungsverfahrens	44
3.2.6 Grenzen des <i>Current-Mode</i> -Regelungsverfahrens	52
3.3 Künstliche Intelligenz in der Leistungselektronik	58
3.3.1 Grundlagen	58

3.3.2	Gradientenverfahren zur Adaption einzelner Funktionen	64
3.3.3	Erweiterung des Gradientenverfahrens auf ein Trainingsverfahren für neuronale Netze	68
3.3.4	Anwendungen	72
4	Moderne Regelungstechnik für Schaltwandler	73
4.1	Regelung mit variabler Schaltfrequenz	75
4.1.1	Techniken zur Optimierung der Effizienz bei geringen Lastströmen	75
4.1.2	Regelung mit konstanter Lade- oder Entladezeit	77
4.1.3	Phasenmodulierte Pulsweitenmodulation	79
4.1.4	Vergleich mit PWM-gesteuerten Wandlern	80
4.2	Regelung unter Verwendung künstlicher Intelligenz	83
4.2.1	Regelung mit Fuzzylogik	83
4.2.2	Auf neuronalen Netzen beruhende Regler	84
4.2.3	Einordnung der Vorarbeiten in Anwendungen für <i>Power over Data Line</i> (PoDL)-Systeme	85
4.3	Nachteile bekannter Ansätze	86
5	Vorgeschlagenes Regelungsverfahren für Schaltwandler	91
5.1	Konzept des Regelungsverfahrens	93
5.2	Herausforderungen der Nutzung neuronaler Netze als Regler	96
5.3	Gesamtsystem zum Trainieren des Reglers	98
5.4	Ermittlung der Trainingsdaten	102
5.4.1	Grundprinzip	102
5.4.2	Definition der Trainingsdaten und Eingangsdaten der Regelung	106
5.4.3	Ideales Regelungsschema	108
5.5	Umsetzung des Reglers als Digitalschaltung	114
6	Anwendung des Verfahrens auf einem Testmuster	117
6.1	Aufbau und Modellierung des Testmusters	120
6.1.1	Signalaufbereitung	121
6.1.2	Modellierung der Strommessung	125
6.1.3	Modellierung des Eingangsnetzwerks	127
6.2	Reglerdimensionierung für das Testmuster	129
6.2.1	Ablauf der Dimensionierung	130
6.2.2	Ermittelter Regler	132
6.2.3	Einfluss der Quantisierung	136

6.3	Einfluss der Dimensionierungsgrößen	137
6.3.1	Einfluss der Anregung zur Erzeugung von Trainingsdaten	139
6.3.2	Einfluss der Dimension des neuronalen Netzes	139
6.3.3	Einfluss der eingehenden elektrischen Größen	141
6.4	Einfluss der Abweichung von Betrieb zu Training	142
7	Messung des Testmusters	147
7.1	Überblick	150
7.2	Messungen	153
7.2.1	Stationäres Verhalten	154
7.2.2	Untersuchung von Lastsprüngen	159
7.2.3	Untersuchung von Sprüngen der Generatorspannung	163
7.2.4	Untersuchung von Abweichungen	166
8	Diskussion und Zusammenfassung	173
9	Ausblick	183
	Symbolverzeichnis	187
	Abkürzungsverzeichnis	197
	Abbildungsverzeichnis	199
	Tabellenverzeichnis	205
	Literatur	207
	Verzeichnis eigener Publikationen als Mit- und Erstautor	213
	Lebenslauf	219

1 Einleitung

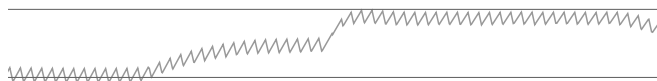
Die vorliegende Promotionsschrift entstand an der Professur für Schaltungstechnik und Netzwerktheorie der Technischen Universität Dresden. Ein Teil der Ergebnisse wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens *fast power* des Bundesministeriums für Bildung und Forschung erarbeitet. In diesem Vorhaben wurden Schaltungskonzepte für kosteneffiziente Systeme zur gleichzeitigen Energie- und Signalübertragung in Automobilen untersucht. Ausgehend von dieser Motivation wird innerhalb dieser Arbeit ein neuartiges Verfahren zur Regelung von Schaltwandlern vorgestellt. Anhand von Messungen eines Testmusters konnte die Funktionalität erfolgreich evaluiert werden, wobei die Schaltfrequenz ein Vielfaches derjenigen von vergleichbaren Vorarbeiten beträgt.

Diese Arbeit ist wie folgt strukturiert. Zunächst erfolgt in Kapitel 2 eine Beschreibung der angestrebten Anwendung und möglicher Lösungsansätze. Die Optimierung der Regelbandbreite von Schaltwandlern wird als zentraler Ansatz verfolgt, sodass in Kapitel 3 eine detaillierte Betrachtung der Grundlagen von Schaltwandlern erfolgt. Dabei wird anhand bekannter Lösungen zur Regelung von Schaltwandlern aufgezeigt, was übliche Vereinfachungen und die daraus resultierenden Grenzen sind. Zudem erfolgt eine Einführung von Ansätzen der künstlichen Intelligenz, welche zur Regelung von Schaltwandlern geeignet sind. Für eine Optimierung der Regelbandbreite geeignete Vorarbeiten werden in Kapitel 4 vorgestellt und deren Eignung für die angestrebte Anwendung diskutiert.

Das in dieser Arbeit vorgeschlagene, neuartige Verfahren zur Optimierung der Regelbandbreite von Schaltwandlern wird in Kapitel 5 präsentiert. Eine entsprechende Anwendung des Verfahrens auf einem Testmuster wird in Kapitel 6 beschrieben. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Messaufbaus und der Messergebnisse in Kapitel 7. Zuletzt werden die Ergebnisse in Kapitel 8 diskutiert und ein Ausblick auf künftige Arbeiten in Kapitel 9 gegeben.

Für eine einheitliche Benennung der elektrischen und mathematischen Größen wurde eine hierarchische Namenskonvention gewählt. Wird beispielsweise die Ausgangsspannung eines Schaltwandlers U_a betrachtet, findet eine Unterscheidung der Ausgangsspannungen von Schaltwandlern je nach Regelungsverfahren mit einem erweiterten Index statt. Im Fall einer Regelung mithilfe eines neuronalen Netzes wird die Ausgangsspannung mit $U_{a,nn}$ bezeichnet. Das Symbolverzeichnis ist dementsprechend hierarchisch strukturiert und stellt Symbol, Einheit und Beschreibung separat von den möglichen, erweiternden Indizes dar. Bei Betrachtung einer zeitkontinuierlich veränderlichen Größe

wird im Beispiel $U_{a,nn}(t)$ verwendet. Zur Beschreibung von abgetasteten Werten und somit zeitdiskret veränderlichen Größen wird das Symbol mit einem Index, wie beispielsweise k , im Beispiel zu $U_{a,nn,k}$ erweitert. Findet zudem eine Quantisierung statt, wird dies mit dem Operator $[]$ bezeichnet, wie beispielsweise $[U]_{a,nn,k}$. Signale im Bildbereich der Laplace-Transformation stellen komplexe Größen in Abhängigkeit von s dar, was beispielsweise mit $\underline{U}_a(s)$ dargestellt wird. Matrizen und Vektoren werden fett gedruckt, wobei Matrizen und deren Elemente in Großschrift dargestellt werden. Vektoren und deren Elemente werden hingegen mit kleinen Formelzeichen definiert. Referenzierungen auf Abbildungen erfolgen mit der vorangestellten Abkürzung "Abb." und Gleichungen werden unmittelbar referenziert.



2 Motivation

In dieser Arbeit wird ein neuartiges Regelungsverfahren zur Regelung von Schaltwandlern vorgestellt. Die angestrebte Anwendung wird in Abschnitt 2.1 beschrieben. Zwei Ansätze zur Lösung der beschriebenen Herausforderung der Anwendung werden in den Abschnitten 2.2 und 2.3 aufgezeigt.

2.1 *Power over Data Line (PoDL)*

Auf dem Weg zum autonomen Fahren findet eine schrittweise Erweiterung moderner Automobile mit einer zunehmenden Anzahl von Sensoren statt, welche für Fahrerassistenzsysteme (engl. *Advanced Driver Assistance Systems*) benötigt werden. Ein hoher Vernetzungsgrad und die Vielzahl der Sensoren führen dabei zu einer starken Erhöhung der Kosten, sodass Fahrerassistenzsysteme hochpreisigen Fahrzeugen vorenthalten bleiben. Damit eine breite Bevölkerungsschicht von dem Sicherheitsgewinn profitieren kann, besteht die Herausforderung auch in kostengünstigen Fahrzeugen viele Sensoren zu verbauen und zu vernetzen.

Um die Kosten trotz hoher Datenraten gering zu halten, haben sich die IEEE Standards 100BASE-T1 und 1000BASE-T1 [IEE15; IEE16] etabliert, welche auf differenzieller Signalübertragung über einer Zweidrahtleitung basieren. Für eine weitere Einsparung von Kosten und Rohstoffen ist die Nutzung der Automobilkarosserie als zweiter Leiter möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür ein Patent angemeldet, welches ein Konzept beschreibt, 100BASE-T1 und 1000BASE-T1 mit einer einzigen, kostengünstigen Eindrahtleitung zu verwenden [Pro+21]. Hierbei wird die Anwendung aber stark auf den konkreten Einsatz in unmittelbarer Nähe zur Karosserie eingeschränkt.

Als weitere Möglichkeit zur Reduktion des Rohstoffbedarfs und der Herstellungskosten kommt eine gemeinsame Nutzung der Zweidrahtleitung zum weiteren Zweck der Energieübertragung in Frage. Unter dem Namen *Power-Over-Ethernet* ist diese gemeinsame Nutzung eines Kabels zur gleichzeitigen Energie- und Signalübertragung aus dem Industrie- und Heimumfeld bekannt. Die zugehörigen IEEE-Standards IEEE 802.3af-2003, IEEE 802.3at-2009 und IEEE 802.3bt-2018 definieren hierbei den entsprechenden Hardwareaufbau. Allen Varianten von *Power-Over-Ethernet* ist hierbei gemein, dass die Energieübertragung mithilfe unterschiedlicher Gleichtaktspannungen mehrerer Zweidrahtleitungen realisiert wird. In solchen Systemen kann für Leitungstreiber beispielsweise ein Aufbau mit einem Digital-analog Umsetzer - englisch: *digital-to-analog converter* (DAC) und einer Ausgangsstufe gewählt

werden [Buh+18; Buh+20]. Dabei wird in [Buh+20] eine *Mixed-Signal*-Regelschleife zur Optimierung der Anpassung der Ausgangsstufe beschrieben.

Für Systeme, deren Leitungstreiber lediglich aus einem DAC bestehen, kann bei gleichzeitiger Energieübertragung gemäß *Power-Over-Ethernet* eine Störung der Gleichtaktspannung des DAC resultieren. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Untersuchung einer *Mixed-Signal*-Regelschleife, welche zur Dämpfung eines Störsignals auf dieser Gleichtaktspannung angewendet werden kann [Pro+19].

Um auch in den Standards 100BASE-T1 und 1000BASE-T1 für Automotive Ethernet eine gleichzeitige Energie- und Signalübertragung zu ermöglichen, ist ein anderes Konzept als jenes von *Power-Over-Ethernet* nötig. Da nur eine einzige Zweidrahtleitung vorhanden ist, steht somit auch nur eine einzige Gleichtaktspannung für die Energieübertragung zur Verfügung. Alternativ zu einer Trennung von Energie- und Signalübertragung mithilfe von Gleich- und Gegentaktspannungen innerhalb eines differenziellen Systems kann eine Trennung im Frequenzbereich stattfinden. Dieser Ansatz wird im IEEE-Standard 802.3bu-2016 [IEE17] verwendet und mit dem Namen *Power over Data Line* (PoDL) bezeichnet. Hierbei erfolgt die Trennung zwischen Energie- und Signalübertragung mithilfe eines Koppelnetzwerks, welches aus Drosselspulen, Kondensatoren und Widerständen besteht [Sch+21].

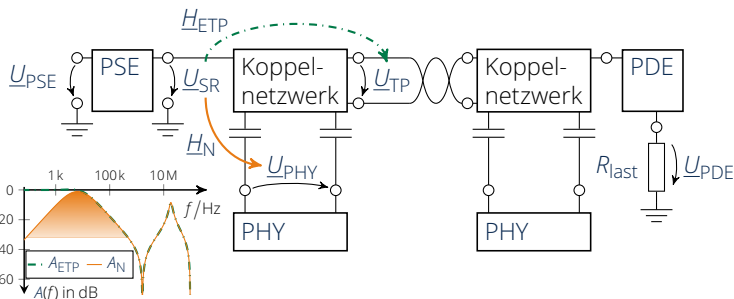


Abbildung 2.1: Grundlegender Aufbau eines PoDL-Systems mit Koppelnetzwerken zur gemeinsamen Übertragung von Energie und Signalen über eine einzige Zweidrahtleitung.

Die schaltungstechnische Umsetzung eines PoDL-Systems ist in Abb. 2.1 dargestellt. Es sind die beiden *Physical Layer-Schaltkreise* (PHY) abgebildet, welche die Signalübertragung gemäß der Standards 100BASE-T1 oder 1000BASE-T1 übernehmen. Die Anbindung an die Koppelnetz-

werke erfolgt mithilfe kapazitiver Kopplung. Zwischen beiden PHY befindet sich die verdrehte Zweidrahtleitung. Hierbei sei U_{TP} die Spannung am Ausgang des linken Koppelnetzwerks bzw. am linken Ende der Zweidrahtleitung. Aufgrund der frequenzabhängigen Dämpfung realer Zweidrahtleitungen unterscheidet sich die Spannung am Eingang des rechten Koppelnetzwerks in Abb. 2.1 im Allgemeinen von U_{TP} .

Innerhalb eines PoDL-Systems ist die Energieübertragung wie folgt formalisiert. Es ist lediglich eine unidirektionale Übertragung von einer Quelle zu einer Senke vorgesehen. Die Energiequelle wird mit *Power Source Equipment* (PSE) und die Energiesenke mit *Powered Device* (PDE) bezeichnet. Der IEEE-Standard 802.3bu-2016 legt dabei mehrere Betriebsmodi fest, welche die PSE-Ausgangsspannung $U_{SR}(t)$ definieren und festlegen, ob eine Spannungsregelung im PSE stattfinden soll. Für diese Arbeit wird der Betriebsmodus *Power Class 9* angestrebt, welcher eine geregelte Spannung $U_{SR}(t) = 48V$ und eine maximale, im PDE umgesetzte Leistung von 50W festlegt [IEE17]. Als Gleichspannungswert für die PSE-Eingangsspannung U_{PSE} wird 12V angenommen, was eine übliche Bordnetz-Spannung von Automobilen ist. Somit wird zur Realisierung das PSE ein Aufwärtswandler angesetzt, welcher die Eingangsspannung U_{PSE} in eine Ausgangsspannung $U_{SR}(t)$ wandelt:

$$U_{SR}(t) = U_{SRA} + U_{SRt}(t) \quad (2.1)$$

$U_{SR}(t)$ kann wie in (2.1) modelliert werden, wobei die Gleichspannung U_{SRA} die ausgeregelte Ausgangsspannung des Aufwärtswandlers unter konstanten Randbedingungen (z.B. Last, Eingangsspannung $U_{PSE}(t)$) darstellt. Unter Annahme von Abweichungen der Randbedingungen, wie beispielsweise sprunghaften Änderungen des Laststromes oder der Eingangsspannung, kann die resultierende Abweichung von U_{SRA} mit einem additiven zeitabhängigen Signal $U_{SRt}(t)$ beschrieben werden. Hierbei muss $U_{SRt}(t)$ nicht mittelwertfrei sein, woraus folgt, dass U_{SRA} nicht dem Mittelwert von $U_{SR}(t)$ entsprechen muss. Dies erlaubt eine gesonderte Betrachtung des Einflusses von sprunghaften Änderungen der Randbedingungen des PSE-Aufwärtswandlers.

An dieser Stelle wird keine Linearisierung oder Kleinsignalmodellierung der Energiequelle angenommen, sondern lediglich die resultierende Ausgangsspannung analysiert. Besonders zu erwähnen ist, dass $U_{SR}(t)$ bei realen Spannungswandlern immer verbleibenden Stör-signalen unterliegt. Der entsprechende Anteil $U_{SRt}(t)$ entsteht dabei beispielsweise aufgrund der nicht-idealen Spannungsregelung. Die Minimierung von $U_{SRt}(t)$ ist eine Motivation für den in Abschnitt 2.3 betrachteten Optimierungsansatz.

$U_{\text{SRt}}(t)$ sei zunächst die allgemeine Beschreibung eines unerwünschten Signalanteils, wie er in praktischen Systemen unvermeidbar ist. Die Qualifikation dieses Signalanteils erfolgt in dieser Arbeit einerseits auf Grundlage der größten Amplitude der Spannung $\hat{U}_{\text{SRt}}$ des Zeitsignals $U_{\text{SRt}}(t)$. Andererseits erfolgt mithilfe der Laplacetransformation die Betrachtung des Signals im Frequenzbereich $\underline{U}_{\text{SR}}(s)$, wobei $U_{\text{SRt}}(t)$ die relevante Eingangsgröße der Transformation ist.

Die Energiesenke eines PoDL-Systems PDE kann aus einem Abwärts-wandler bestehen, welcher eine Last (z.B. R_{last}) versorgt. Dabei erfolgt eine Abwärtswandlung auf die Spannung U_{PDE} , deren Gleichspannungswert beispielsweise 5V oder 12V betragen kann.

Zur Analyse des Einflusses von der Energie- auf die Signalübertragung werden Übertragungsfunktionen im Bildbereich der Laplacetransformation definiert. Hierbei sei $\underline{H}_{\text{ETP}}(s)$ die Übertragungsfunktion von $\underline{U}_{\text{SR}}(s)$ auf $\underline{U}_{\text{TP}}(s)$ und charakterisiert den Einfluss der Energieübertragung auf die Zweidrahtleitung:

$$\underline{H}_{\text{ETP}}(s) = \frac{\underline{U}_{\text{TP}}(s)}{\underline{U}_{\text{SR}}(s)} \quad (2.2)$$

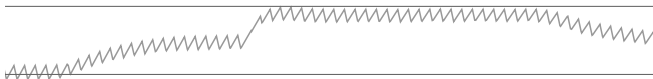
$$A_{\text{ETP}}(f) = -20 \cdot \log_{10} |\underline{H}_{\text{ETP}}(j2\pi f)| \quad (2.3)$$

$A_{\text{ETP}}(f)$ beschreibt laut (2.3) hierbei die frequenzabhängige Dämpfung des Koppelnetzwerks von $\underline{U}_{\text{SR}}(s)$ auf $\underline{U}_{\text{TP}}(s)$. Das Spektrum von $A_{\text{ETP}}(f)$ wird von den verwendeten Bauelementen des Koppelnetzwerks bestimmt. Eine geringere Knickfrequenz des ersten Tiefpasses ist nur realisierbar, wenn größere und dementsprechend teure Drosselspulen verwendet werden [Sch+21]. Zudem reduzieren größere Drosselspulen die Dämpfung bei hohen Frequenzen aufgrund erhöhter parasitärer Koppelkapazitäten. Somit besteht eine praktische Grenze der Dämpfung $A_{\text{ETP}}(f)$ für Frequenzen unterhalb 130 kHz [Sch+21].

In Abb. 2.1 wird nur der linke PHY betrachtet, wobei analog dazu Übertragungsfunktionen für den rechten PHY angegeben werden können. Die Signalübertragung wird in beiden PHY kapazitiv auf die Zweidrahtleitung gekoppelt und kann für den linken PHY in Abb. 2.1 mit der Übertragungsfunktion $\underline{H}_{\text{DTP}}(s)$ wie folgt beschrieben werden:

$$\underline{H}_{\text{DTP}}(s) = \frac{\underline{U}_{\text{PHY}}(s)}{\underline{U}_{\text{TP}}(s)} \quad (2.4)$$

Hierbei ist $\underline{U}_{\text{PHY}}(s)$ die Spannung des *full-duplex*-Signals direkt an einem PHY. Aus der Verwendung von kapazitiver Kopplung folgt ein Hochpass-effekt, welcher eine Dämpfung für sehr geringe Frequenzen ermöglicht. Der Einfluss von der Energie- auf die Signalübertragung kann über die



Kombination der beiden Übertragungsfunktionen $\underline{H}_{ETP}(s)$ und $\underline{H}_{DTP}(s)$ mithilfe der Übertragungsfunktion $\underline{H}_N(s)$ beschrieben werden [Sch+21]:

$$\underline{H}_N(s) = \frac{\underline{U}_{PHY}(s)}{\underline{U}_{SR}(s)} \quad (2.5)$$

$$A_N(f) = -20 \cdot \log_{10} |\underline{H}_N(j2\pi f)| \quad (2.6)$$

Die Dämpfung $A_N(f)$ laut (2.6) kann in einem realen System nicht beliebig hohe Dämpfungswerte im relevanten Frequenzbereich erreichen. Geringe Dämpfungswerte beschreiben hierbei, dass Signalanteile von $\underline{U}_{SR}(s)$ in großem Maß auf $\underline{U}_{PHY}(s)$ übertragen werden.

In Abb. 2.1 sind qualitative Verläufe von $A_{ETP}(f)$ und $A_N(f)$ (mit $s = j2\pi f$) dargestellt, welche den Untersuchungen in [Sch+21] entsprechen. Der orangefarbene hervorgehobene Bereich verdeutlicht schematisch die Dämpfung $A_N(f)$ des in [Sch+21] betrachteten Koppelnetzwerks. Zwischen 330 Hz und 130 kHz beträgt diese dort weniger als 20 dB, sodass die Spannung $U_{SRt}(t)$ am Ausgang des Aufwärtswandlers mit nur geringer Dämpfung auf die Spannung U_{PHY} übertragen wird.

Aufgrund der Motivation einer Einsparung von Kosten und Rohstoffen, besteht die Anforderung die Schaltwandler von PSE und PDE kostengünstig umsetzen zu können. Daraus resultiert die Notwendigkeit von Bauelementen geringer Größe.

Um ein PoDL-System für die angestrebten, sicherheitskritischen Fahrerassistenzsysteme anwenden zu können, muss dessen Bitfehlerrate denselben Wert erreichen, wie die reine Signalübertragung mittels 100BASE-T1 bzw. 1000BASE-T1. Wird die Spannung $U_{SRt}(t)$ durch das Koppelnetzwerk nicht hinreichend gedämpft, kann der auf $\underline{U}_{PHY}(s)$ übertragene Anteil zu fehlerhaften Entscheidungen und entsprechenden Fehlern in der Signalübertragung führen. Um trotz des Frequenzbereichs mit geringer Dämpfung gemäß Abb. 2.1 eine Verschlechterung der Bitfehlerrate zu vermeiden, muss $U_{SRt}(t)$ minimiert werden. Die Minimierung der Spannung $U_{SRt}(t)$ laut (2.1) ist daher die zentrale Motivation dieser Arbeit.

2.2 Lösungsansatz mit aktiver Störsignalunterdrückung

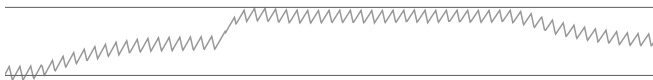
Ein möglicher Ansatz, den Einfluss der Spannung $U_{SRt}(t)$ auf die Signalübertragung zu minimieren, ist eine aktive Störsignalunterdrückung [Sch+21]. Dabei werden adaptive Filter mit endlicher Impulsantwort

(engl. *finite impulse response filter*) (FIR) trainiert, welche eine Stromquelle innerhalb des Koppelnetzwerks ansteuern. Dieser Ansatz ist in der Lage, die Dämpfung $A_N(f)$ im hervorgehobenen Bereich in Abb. 2.1 deutlich zu erhöhen.

Der genaue Aufbau der angesteuerten Stromquelle wird in [BPE25] beschrieben. Aufgrund der hohen Spannungen von beispielsweise $U_{SRA} = 48\text{V}$ findet eine Trennung in einen Niederspannungs-DAC und zwei Hochspannungs-Ausgangsstufen im AB-Betrieb statt [Sch+22]. Die Ansteuerung der Ausgangsstufen erfolgt mit einem 11 bit-DAC, welcher wiederum vom adaptiven FIR angesteuert wird. Aufgrund der Verwendung von adaptiven FIR führen nichtlineare Kennlinien des DAC und der Ausgangsstufen zu einem Fehler und somit zu einer geringeren erreichbaren Dämpfung $A_N(f)$. Um die aussteuerungsabhängige, nichtlineare Kennlinie des DAC zu linearisieren, sind verschiedene Ansätze möglich. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung eines Pseudozufallszahlengenerators, welcher einen Wechsel der einzelnen Stromzellen während des Betriebs definiert. Dies wird mit *Dynamic Element Matching* (DEM) bezeichnet und beispielsweise in [Sch+24] verwendet. Hierbei ist eine umfangreiche Digitalschaltung mit mehreren Takten Latenz notwendig. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde [Sch+24] mit einer Analyse der limitierenden parasitären Effekte zugearbeitet. Aufgrund der in [Sch+21] betrachteten Empfindlichkeit der Dämpfung auf eine Latenz, ist die Verwendung von DEM zur Erhöhung der Linearität ungeeignet.

Eine weitere Möglichkeit, die Linearität eines DAC zu erhöhen, besteht in einem optimierten Layout. Dies erlaubt die Abweichungen des Ausgangsstroms einzelner Stromzellen und des Verhältnisse zwischen Stromzellen unterschiedlicher Wertigkeit zu minimieren. In [BPE25] wird ein dementsprechender Ansatz mit vier Quadranten zu je 64 Stromzellen verfolgt, wobei herstellungsbedingte Abweichungen durch eine spezielle räumliche Verteilung teilweise kompensiert werden können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Software zur automatisierten Layouterstellung entworfen. Dies ermöglichte die Umsetzung des aufwändigen Platzierens und Verdrahtens der Stromzellen in [BPE25]. Des Weiteren erfolgte in der vorliegenden Arbeit der Entwurf eines Software-Frameworks zur automatisierten Messung mithilfe von Laborgeräten. Die Verwaltung der Messdaten in einer Datenbank ermöglichte sehr umfangreiche Messungen in der dieser Arbeit sowie in [BPE25; BPE25; Sch+21].

Als großer Nachteil des Ansatzes mit aktiver Störsignalunterdrückung stellt sich der große schaltungstechnische Aufwand dar. Zusätzlich zu den Schaltwandlern muss das PoDL-System um die komplexe Schaltung



gemäß [Sch+21] erweitert werden. Außerdem sind zusätzliche, große Kondensatoren erforderlich, aus denen die Stromquelle versorgt wird. Es folgen somit hohe Kosten des realen Systems, sodass dieser Ansatz nicht näher betrachtet wird.

2.3 Lösungsansatz eines Schaltwandlers mit maximal hoher Regelbandbreite

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz besteht darin, die Schaltwandler derart zu optimieren, dass die Spannung $U_{SRt}(t)$ für eine Vielzahl von Betriebsbedingungen minimiert wird. Dies erlaubt die Verwendung kostengünstiger Koppelnetzwerke und keine zusätzliche Schaltungstechnik wie der Ansatz in Abschnitt 2.2.

Wird die Regelbandbreite maximiert, erfolgt eine bestmögliche Ausnutzung der verwendeten Schaltungstechnik. Bisherige Lösungen nutzen stark vereinfachte Modelle, um die Regelung umzusetzen. Dies erfordert eine konservative Auslegung der Regelung, welche zu größerem Überschwingen und größerem Restfehler der Ausgangsspannung $U_{SR}(t)$ führt. Der in dieser Arbeit vorgeschlagene Ansatz verfolgt die Maximierung der Regelbandbreite und basiert auf einer komplexen Modellierung des zu regelnden Schaltwandlers.

3 Grundlagen von Schaltwandlern